

Análisis de las fisuras del *Celler Cooperativo* de Rocafort de Queralt

Cracking study of the "Celler Cooperativo" in Rocafort de Queralt

L. Calderón^(*), J. Maristany^(*)

RESUMEN

En el presente trabajo se analizan las patologías existentes en el edificio del *Celler Cooperativo* de Rocafort de Queralt: obra del arquitecto César Martinell y catalogado como Patrimonio Nacional de Cataluña.

La finalidad es llegar a determinar los patrones de fisuración de las zonas afectadas. Para ello se presenta una metodología basada en un comportamiento "elástico lineal". Pero en ningún momento se pretende presentar una herramienta para determinar las características mecánicas de la fábrica.

Veremos como el método propuesto resulta acertado, ya que el patrón de fisuración que se llega a obtener al final del estudio es prácticamente igual a las fisuras reales que presenta la zona analizada.

SUMMARY

In this work, we analyse the pathologies of the building "Celler Cooperativo" in Rocafort de Queralt, included in the National Patrimony of Catalonia. This building was designed by the architect César Martinell.

Based on "linear elastic" behavior, we determine a cracking patterns in the affected areas of the structure, but we do not intend to get the masonry mechanics characteristics.

As will be shown, our method entails a cracking patterns wich to a very high extent fits the real cracks.

169-5

Palabras clave: Mampostería; fisura; arco; deformación; tensión.

Keywords: Masonry; crack; arc; deformation; stress.

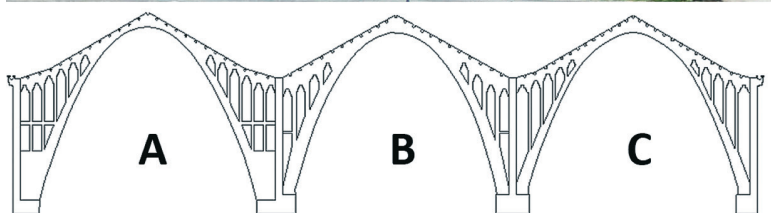
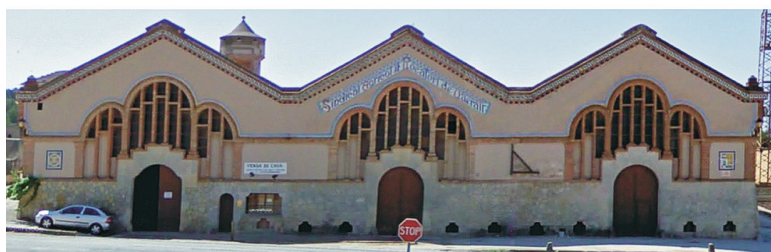
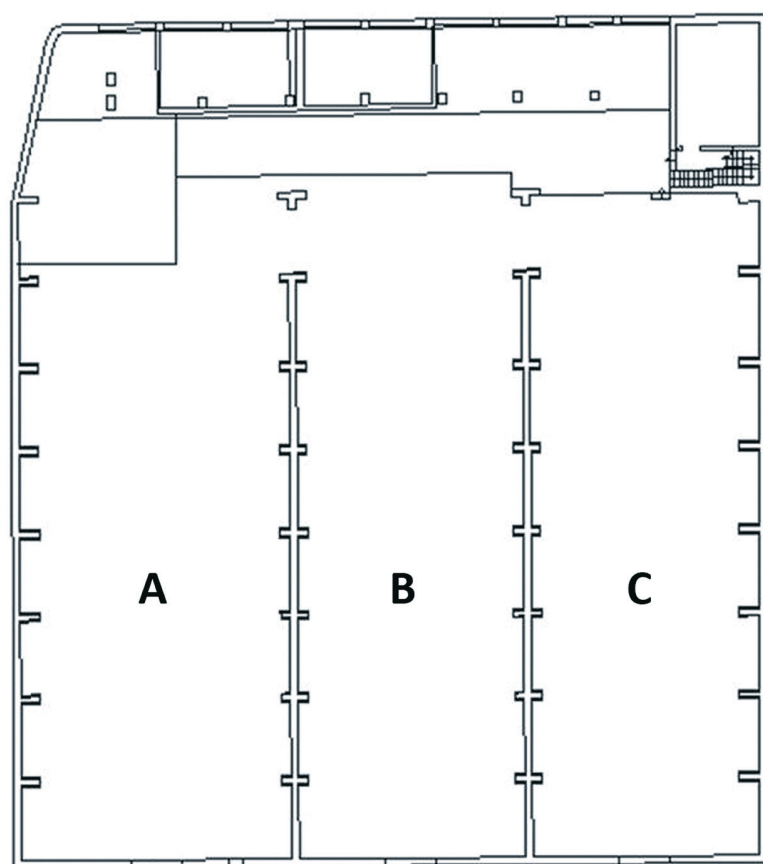
(*) ETSAB - Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona (España)
Persona de contacto/Corresponding author: lucrecia.calderon@upc.edu (L. Calderón)

¹ Los "Cellers" son bodegas modernistas –llamadas "Catedrales del Vino" por Ángel Guimerà– que constituyen edificaciones de gran valor dentro del patrimonio arquitectónico de la Conca de Barberá y de Cataluña, los arquitectos que realizaron estas obras fueron Pere Domènech y Cèsar Martinell.

1. INTRODUCCIÓN

La obra de fábrica ha sido un material utilizado desde hace muchas décadas, es por ello que un buen número de los edificios catalogados como Patrimonio Arquitectónico fueron construidos con este material. En la actualidad muchos de estos edificios presentan serias patologías, como es el caso del edificio que analizaremos: el *Celler¹ Cooperativo* de Rocafort de Queralt. Este edificio fue construido siguiendo los principios básicos de la arquitectura modernista catalana: trazado de los polígonos funiculares, inversión catenárica, trabajo por la forma a compresión y evitando el comportamiento a tracción.

1. Planta, alzado y sección transversal del edificio.



Dada la complejidad que implica estudiar el comportamiento de este material, por definición heterogéneo, algunos investigadores recurren a métodos plásticos muy complejos, como son los macro y micro-modelos; mientras que otros consideran que se pueden utilizar métodos elásticos, siempre y cuando se utilicen sólo para obtener patrones de fisuración.

El presente trabajo, tal como ya se ha comentado, no pretende determinar las características mecánicas del material sino que su objetivo es llegar a plantear cuáles son los patrones de fisuración, analizando específicamente las patologías que en la actualidad presenta el edificio, tema de este estudio.

2. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

El *Celler Cooperativo* está localizado en la población de Rocafort de Queralt (comarca de la Conca de Barberá, Tarragona). Fue la primera obra agraria del Arq. César Martinell y su catalogación como Patrimonio Nacional se produjo el año 2003 por la Generalitat de Cataluña.

El edificio está formado por un grupo de tres naves, las cuales fueron construidas en diferentes épocas (1918, 1931 y 1948 respectivamente). El trazado de los arcos, que forman los pórticos transversales, difiere en su geometría en cada una de las naves (Figura 1).

Las dimensiones de los arcos interiores, que forman la sección transversal del edificio, son las siguientes: izquierdo (nave-A) $b=11,50\text{m} - h=9,90\text{m}$; central (nave-B) $b=10,60\text{m} - h=9,60\text{m}$ y derecho (nave-C) $b=11,10\text{m} - h=9,60\text{m}$.

En la parte posterior del edificio se encuentra una cuarta nave, construida dentro de la última etapa y que se utiliza como área de carga y descarga.

3. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL EDIFICIO

El actual estado general de los arcos se pueden apreciar en las imágenes de la Figura 2. Aparentemente no se observan problemas relevantes, pero sí nos permiten apreciar la elegancia de los mismos y el interés por su conservación.

Sin embargo, en las fotos de detalle se pueden apreciar serias patologías que se localizan preferentemente en la esquina superior, tanto de los arcos de la nave izquierda (Figura 3), como de la derecha (Figura 4).

Dada la localización de las fisuras, en los diferentes arcos, se puede establecer como hipótesis que la influencia del viento hace posible que las paredes laterales, de cada una de las naves en cuestión, se separen de los arcos, ya que pueden llegar a originar tensiones de tracción superiores a las que puede resistir la fábrica. Es por ello que en el estudio que se expone se han considerado las cargas gravitatorias de peso propio y de nieve y la de viento.

Cabe indicar que las claves de los arcos no presentan patologías, y en que la nave central las fisuras apreciadas son mucho menores.

También es importante indicar que todas las fisuras siguen un mismo esquema. Sin embargo, la forma presenta ciertas variaciones dependiendo del material que ha fallado primero, ya sea la fábrica o el mortero, esto se puede apreciar con claridad en la Figura 4.

4. MÉTODO UTILIZADO (1)

El método que se presenta a continuación que ha sido desarrollado en la Tesis Doctoral de uno de los autores de este artículo (1) se encuentra en un rango "Elástico Lineal", por considerar que siempre nos movemos en valores que se encuentran dentro de dicha rama del diagrama si bien en el momento que se supera la resistencia a tracción de la fábrica, se reconoce la separación de los nodos.

La finalidad es obtener patrones de fisuración de los modelos y confirmar que resulta perfectamente factible la aplicación directa de los métodos lineales. Este razonamiento sustentado claramente por algunos investigadores (2) (3) (4), no es, sin embargo, aceptado por otros (5) (6) que entienden como necesario considerar métodos de tipo no lineal.

El progreso de la fisura se realiza de modo manual y es un proceso iterativo. Considera dos aspectos centrales: la localización de la fisura y la determinación de la trayectoria de la misma.

La localización de la fisura se realiza de acuerdo a los siguientes pasos: selección de toda la zona traccionada del modelo; selección de la zona traccionada que supera la σ_t ; selección de la zona que rompe primero; formación del primer grupo de fisuras; localización de las zonas menos tensionadas que no desaparecen de una etapa a otra; formación de fisuras en las zonas localizadas en el paso anterior.

Mientras que la trayectoria que sigue la fisura está determinada por –el máximo valor– que se obtiene al realizar la integración de las fuerzas en las diferentes direcciones



2a



2b



3



4a



4b

de los vectores que se encuentran en la cabeza de la fisura.

A continuación se indican aspectos relevantes que se deben tener en consideración para seguir esta metodología:

- Los parámetros del comportamiento mecánico del material se deben conocer en su totalidad. En el caso de nuestro ejemplo se consideran los siguientes valores: $\gamma = 18.000 \text{ N/m}^3$ (densidad); $E = 5,70 \text{ E} + 09 \text{ N/m}^2$; $G = 2,30 \text{ E} + 09 \text{ N/m}^2$ y $\psi = 0,20$ (coef. poisson).
- Para medir la resistencia a compresión de la fábrica se toma como límite el valor de $3,20 \text{ N/mm}^2$ ($32,00 \text{ Kg/cm}^2$), en consecuencia se desprecia la contribución del material con excesivas compresiones por no ser capaz de soportar más esfuerzos.
- El material rompe cuando supera su resistencia de cálculo a tracción de $0,32 \text{ N/mm}^2$ ($3,20 \text{ Kg/cm}^2$) y no se considera la existencia de la rama de ablandamiento.
- Las máximas tracciones se deben localizar en la cabeza de la fisura, nunca en los labios de la misma.

2a y 2b. Foto de la nave izquierda (A) y central (B).

3. Fisuras localizadas en el extremo superior del arco de la nave izquierda (A).

4a y 4b. Fisuras localizadas en el extremo superior de arcos de la nave derecha (C).

5. Especificación de la zona a analizar, extremo superior derecho de la nave derecha.

6. a) Modelo sin fisuración,
b) Primera etapa de fisuración y
c) Rotura completa.

7. Representación de las deformaciones de los modelos A, B y C.

–La distancia entre fisuras se limita a la dimensión de la propia pieza de cerámica.

–Las direcciones de las fisuras que se generan en el proceso de cálculo deberán ser perpendiculares a los vectores de las direcciones principales de tracción que las originan.

–Se permite que en un punto sobretensionado a tracción se forme una fisura y como máximo, dos. El ángulo que forman ambas se determina en la mayoría de los modelos por el sentido de los vectores de fuerzas.

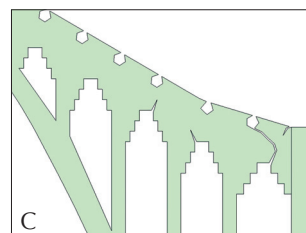
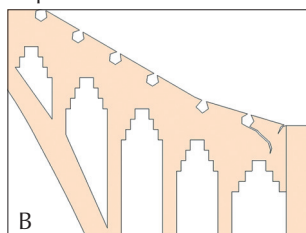
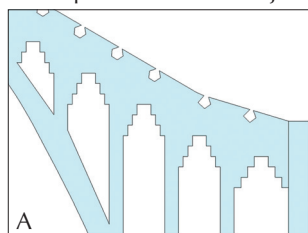
5. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

Los programas que se han utilizado para el estudio de los modelos informáticos son: como pre y post procesador el programa GID² y para la realización de los cálculos el programa Ram-Shell³.

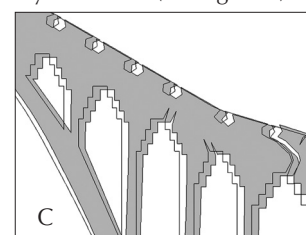
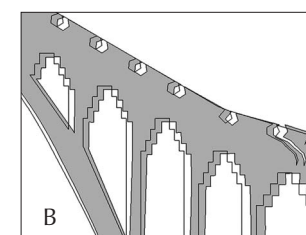
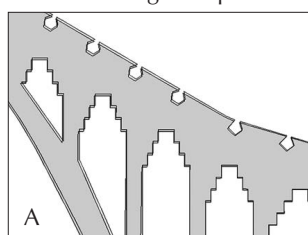
De éste último se utiliza como tipo de análisis el “Estático Lineal” y se emplea una malla integrada por elementos finitos triangulares con 6 grados de libertad para representar la fábrica, mientras que para modelizar los forjados se utilizan elementos tipo barra.

6. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS

El modelo representa una de las paredes centrales del edificio, cuyo inter-eje entre pórticos es de 3,00m aproximadamente. La cubierta es de cerámica cuyo entramado de vigas es de madera con un inter-eje de 0,50 m. Cabe indicar que las paredes de los extremos se han modelizado con el espesor real equivalente al inter-eje entre pórticos.



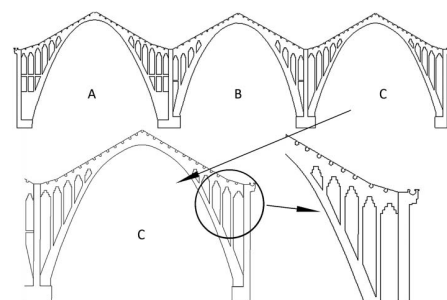
El estado de carga utilizado en los modelos es el siguiente: cargas lineales verticales de “peso propio + nieve” en cubierta de 9.000 N/m (carga superficial de 3.000 N/m²); cargas lineales horizontales de presión de viento de 1.600 N/m y de succión de 800N/m. Estas cargas se mantienen constantes a lo largo del proceso de fisuración.



Las condiciones de contorno consideradas han sido las siguientes: las bases de los diferentes arcos están empotradas y las caras laterales están libres.

También es importante indicar que en los modelos se incluyen: los dos forjados laterales en la nave central “B” y un forjado de la nave “C”, con elementos lineales.

Los modelos desarrollados incluyen las tres naves que constituyen los pórticos transversales del edificio, sin embargo el proceso de fisuración se ha modelizado únicamente en la zona superior derecha de la nave derecha (Figura 5).



5

7. RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos representan las diferentes etapas de fisuración consideradas, el primer modelo sin fisuras, el segundo modelo con un primer grado de fisuración y el tercero con la rotura completa de la pared, apreciándose sus esquemas en la Figura 6. En el gráfico “C” se puede distinguir con precisión la formación del patrón de fisuración final.

En la evolución de los gráficos de las deformaciones se puede apreciar como al entrar en carga la pared, ésta tiende a desplazarse hacia la derecha y hacia abajo dando lugar a tracciones muy localizadas. A medida que la fisura aumenta, como era de esperar, las deformaciones de dicha zona también aumentan de modo muy acelerado (ver Figura 7).

² Desarrollado por © 2010 CIMNE International Center for Numerical Methods in Engineering. gid@cimne.upc.edu

³ Programa desarrollado por © 2001-2009 Compass Ingeniería y Sistemas S.A.

Para una mejor interpretación de los resultados, se ha representado la dirección de los vectores principales de la siguiente manera: el color negro para las compresiones y el color gris para las tracciones.

Si comparamos los resultados del recorrido de los vectores de las direcciones principales "Sii", de los tres modelos de la Figura 8, se puede apreciar como las compresiones se canalizan con mayor intensidad a lo largo del recorrido del arco interior, tal como era de esperar en el comportamiento de un arco.

En el gráfico "C", en cambio, la pared llega a experimentar una relajación muy notoria y también se puede apreciar la presencia de nuevas fisuras.

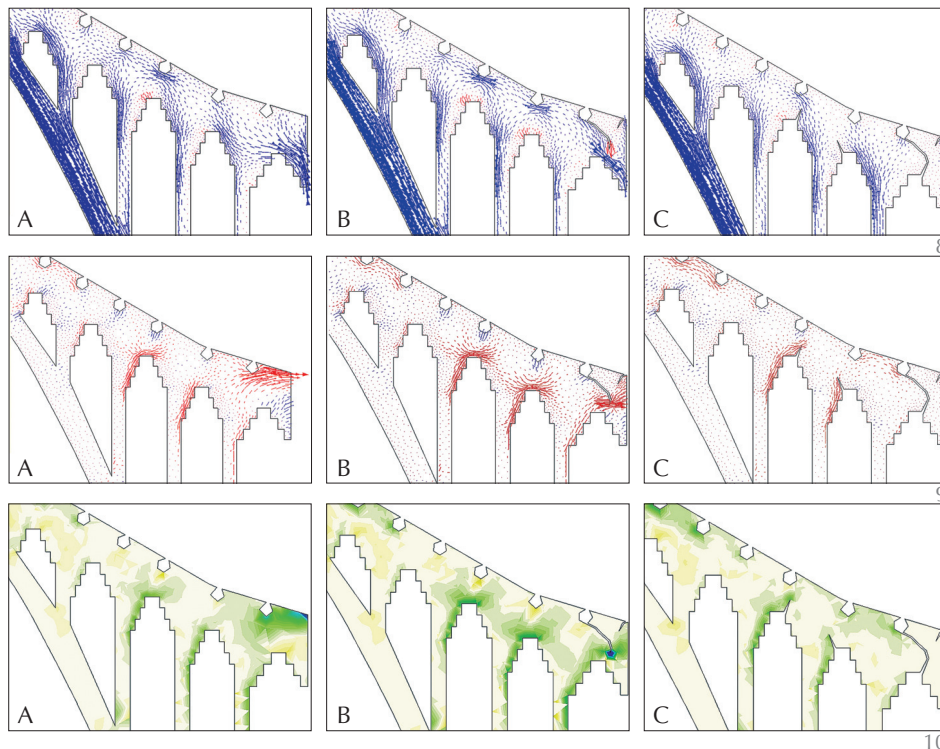
En los modelos de las fuerzas "Nx", de la Figura 10, se puede apreciar una gran concordancia con los modelos anteriores. Estos gráficos de fuerzas se representan con una cromática que incluye dos gamas: una gama de colores cálidos (amarillo y rojo) que simbolizan compresiones y una gama de colores fríos (verde y azul) que representan tracciones.

8. Representación de los vectores de las tensiones principales "Sii" de los modelos A, B y C.

9. Representación de los vectores de tensiones principales "Si" de los modelos A, B y C.

10. Representación de las fuerzas en la dirección "Nx" de los modelos A, B y C.

11. Comparativa entre las fisuras reales (A) y el patrón de fisuración resultante (B).



Es importante indicar que a medida que se desarrolla la fisuración se intensifican las zonas traccionadas existentes en el modelo "A", sin embargo, no llegan a superar a las tracciones que se producen en el sentido opuesto.

Si analizamos ahora el recorrido de las direcciones de los vectores principales "Si", de los modelos de la Figura 9, podemos apreciar como aparecen tracciones concentradas principalmente en la zona superior derecha y en la zona en que se ubica la primera viga de madera "A". En este caso las tensiones que se originan son superiores al 10% de la resistencia a compresión de la fábrica, dando lugar, por lo tanto, a las primeras fisuras. La existencia de éstas origina que la pared pierda rigidez y con ello, a igualdad de carga, acelera considerablemente su deformación.

En el gráfico "B" se observa con claridad como en las cabezas de las fisuras se producen sobre-tensiones que pueden hacer posible el colapso de dicha zona de la pared.

8. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se pueden obtener son las siguientes:

a. El método utilizado para la obtención de patrones de fisuración proporciona resultados fiables (por supuesto teniendo en con-





12. Comparativa de algunos arcos, localizados en la misma zona de análisis.

sideración los parámetros indicados en el punto-4), tal como se puede comprobar en la Figura 11, en el que se comparan la fisura real con el resultado del modelo informático, constatando así que el resultado corresponde con bastante precisión a la realidad.

b. Los patrones de fisuración de la pared “SI” se pueden obtener con bastante precisión utilizando un método basado en una teoría elástico lineal, tal como el que se expone en este artículo. Pero “NO” se puede utilizar en el caso de querer determinar las características mecánicas del material, ya que para su aplicación estos datos son indispensables.

c. Los recorridos de las grietas reales difieren una de otra, tal como se observa en la Figura 12, a causa de la diferencia de resistencia de los materiales que forman la pared. Lógicamente, rompe primero el de menor resistencia: mortero (A), aunque en alguno de los casos rompe incluso la fábrica (B, C y D).

d. Sin embargo, y de modo general, coincide que la fisura se inicia en el lado derecho del apoyo de la primera viga y termina en el lado superior derecho del primer hueco, tal como ocurre con el patrón de fisura obtenido en este estudio.

12

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Calderón, L.: *Estudio sistemático de los apeos en paredes de obra de fábrica, con especial atención a la fisuración y a los mecanismos de colapso*. Tesis Doctoral, Barcelona, Departamento de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona-UPC, 2009.
- (2) Cecchi, A. y Sab, K.: “A multi-parameter homogenization study for modeling elastic masonry”. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 21, 2002, pp. 249-268.
- (3) Kong C. S.: *A universal approach for the analysis and design of masonry infilled frame structures*. Canada: Doctoral Thesis, The University of New Brunswick, Academic Unit of Civil Engineering, 1998.
- (4) Reyes, E.; Casati, M. J. y Gálvez, J. C.: “Rotura de probetas de fábrica de ladrillo a escala bajo tensiones normales y tangenciales”. *Anales de Mecánica de la Fractura*, vol. 2, 2003, pp. 594-500.
- (5) Roca, P.; Molins, C. y Marí, A. R.: “Strength capacity of masonry wall structures by the equivalent frame method” [publicación periódica], *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2005, pp. 1601-1610.
- (6) Romera L. E.; Hernandez S. y Reinoso J. M.: “Numerical characterization of the structural behaviour of the Basilica of Pilar in Zaragoza (Spain). Part 1: Global and local models” [publicación periódica], *ScienceDirect: Advances in Engineering Software*, 39, 2008, pp. 301-314.

* * *